

Produktkonfiguration von Flachstahlerzeugnissen

Matthias Wichmann
Thomas Volling
Thomas S. Spengler

Veröffentlicht in:
Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2012
Tagungsband der MKWI 2012
Hrsg.: Dirk Christian Mattfeld; Susanne Robra-Bissantz



Braunschweig: Institut für Wirtschaftsinformatik, 2012

Produktkonfiguration von Flachstahlerzeugnissen

Matthias Wichmann

Technische Universität Braunschweig,
Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, 38106 Braunschweig,
E-Mail: ma.wichmann@tu-braunschweig.de

Thomas Volling

Technische Universität Braunschweig,
Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, 38106 Braunschweig,
E-Mail: t.volling@tu-braunschweig.de

Thomas S. Spengler

Technische Universität Braunschweig,
Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, 38106 Braunschweig,
E-Mail: spengler@tu-braunschweig.de

Abstract

Kundenanfragen nach flachgewalzten Stahlprodukten sind geprägt von einer hohen Variantenvielfalt. Diese resultiert aus individuellen Anforderungen an die zu verwendenden Legierungen sowie die Produktgeometrie. Im Rahmen der Anfragebearbeitung ist zunächst zu prüfen, ob angefragte Produkte durch das Produktionssystem herstellbar sind. Die Herstellbarkeit wird durch vielfältige Restriktionen eingeschränkt. Die derzeit zur Prüfung eingesetzten Produktkataloge sind allerdings, insbesondere im Grenzbereich des technisch Möglichen, ungenau. In diesem Beitrag wird daher die Basis eines Produktkonfigurators entwickelt. Dieses Informationssystem ermöglicht die Prüfung der Herstellbarkeit einer Anfrage und bietet Ansätze zu ihrer Bewertung. In diesem Beitrag werden hierfür ein modularer Modellansatz sowie eine prototypische Implementierung zur Anwendung vorgestellt.

1 Einleitung

In der Stahlindustrie verschieben sich die Erzeugung und der Vertrieb von Flachstahlprodukten deutlich in Richtung einer zunehmenden Individualisierung der Nachfrage. Dies ist vielfältigen externen Anforderungen an die Stahlerzeuger geschuldet. So wird eine immer größere Anzahl spezialisierter Stahllegierungen angefragt. Zudem sollen Endprodukte möglichst endformnah und damit kundenindividuell spezifiziert sein. Dies betrifft neben der Stahllegierung insbesondere die geometrischen Abmessungen sowie die Beschaffenheit der Produktoberfläche.

Auf Seiten des Herstellers steht diesen Anforderungen ein flexibles Produktionssystem gegenüber. Das Produktionssystem umfasst vier wesentliche Produktionssegmente. Im ersten Segment werden Stahllegierungen in einer flüssigen Verarbeitungsphase erzeugt. Hierbei wird die chemische Zusammensetzung des erzeugten Stahls fixiert. Das zweite Segment ist die Urformgebung. Hier wird der flüssige Stahl in feste Brammen, rechteckige Stahlblöcke mit einer deutlich größeren Länge als Breite, gegossen. Im dritten Segment werden die Brammen zu kundenindividuellen Coils umgeformt. Ein Coil ist dabei eine Rolle aufgewickelten flachgewalzten Stahlbands. Die Umformung geschieht mittels Zuschneiden, Stauchen und Walzen. Das vierte Segment ist die Oberflächenveredelung. Hierbei werden die Oberflächen der Coils kundenindividuell bearbeitet. So werden Coils mittels Beizen gereinigt oder Veredelungsschichten wie Zink, Lack oder Folien auf die Oberfläche aufgebracht. Durch die geeignete Ausgestaltung der Zwischenprodukte sowie von Produktionsparametern wie Geschwindigkeiten, Walzkräften oder Drücken können flexibel nahezu beliebige Coils erzeugt werden. [5]

Die Flexibilität der Produktion ist allerdings nicht unbegrenzt. So treten in Produktionsprozessen Restriktionen auf, die das herstellbare Produktportfolio einschränken. Dies können allgemein gültige oder legierungsspezifische Restriktionen an einzelnen Aggregaten des Produktionssystems sein. Darüber hinaus resultieren Restriktionen auch aus dem Zusammenspiel verschiedener Aggregate oder Produktionsbereiche.

Aufgrund der unvollständigen Flexibilität besteht ein Informationsbedarf über die Herstellbarkeit kundenindividueller Produkthanfragen. Dieser kann entweder indirekt durch die Abstimmung mit der Vertriebsabteilung des Herstellers oder direkt durch den Kunden mittels öffentlich zugänglicher Quellen und Werkzeuge gedeckt werden. Bislang wird häufig der indirekte Weg verfolgt. Allerdings wächst in den letzten Jahren durch die steigende Nutzung von Internet-Diensten auch der Bedarf nach direkten Informationen. Grundlage zur Deckung beider Informationsbedarfe ist ein geeignetes Informationssystem, welches dem Anfragenden, Vertriebsmitarbeiter oder Kunden, die notwendigen Informationen zur Verfügung stellt.

Zur Prüfung werden in der Regel Produktkataloge eingesetzt ([4], [6]). Diese bilden das herstellbare Produktportfolio oftmals basierend auf Erfahrungen des Herstellers ab. Den Katalogen liegen dabei statische Informationen zu Grunde. Darüber hinaus vereinfachen Produktkataloge das herstellbare Produktportfolio um eine tabellarische Darstellung zu ermöglichen. In der Folge sind Produktkataloge sehr gut geeignet, um Standardprodukte zu beschreiben oder weit außerhalb der Produktionsflexibilität liegende Produkte bei Kundenanfragen auszuschließen.

Insbesondere im Grenzbereich des technologisch Möglichen sind Produktkataloge nicht immer aussagefähig („nicht alle Breiten- Dickenkombinationen zulässig“, vgl. [6]). In der Folge können fehlerhafte Informationen aus Produktkatalogen abgeleitet werden. Dies hat zwei wesentliche Nachteile. Zum Einen werden Kundenaufträge, welche nicht herstellbar sind, fälschlicherweise als herstellbar eingestuft und vom Vertrieb angenommen. Im Resultat müssen diese Kundenaufträge nachträglich kostenintensiv geändert oder abgelehnt werden, was mit einer entsprechend negativen Kundenzufriedenheit einhergeht. Zum Anderen werden Kundenaufträge, welche herstellbar sind, abgelehnt, was zu entgangenen Deckungsbeiträgen führt. Um beide Effekte zu umgehen, wird in Produktkatalogen für bestimmte Produktmerkmalskombinationen oftmals auf eine individuelle Abstimmung verwiesen („nach Vereinbarung“, [4]). Diese erfordert die spezifische Prüfung durch Experten und geht mit einem meist mehrstündigen Zeitbedarf einher.

Um diese Nachteile zu überwinden besteht ein Bedarf nach richtigen Informationen über die Herstellbarkeit von Produkten auch im Grenzbereich des technologisch Möglichen. Hierbei muss insbesondere die Flexibilität der Produktion berücksichtigt werden. Dafür ist ein flexibles Beschreibungsmodell des Produktionssystems notwendig, welches alle möglichen Produktionsketten zur Erzeugung gewünschter Endprodukte umfasst. Dieses Modell muss mittels IT-Systemen abgebildet und verarbeitet werden können, um zeitnah bestehende Informationsbedarfe zu decken. Hierbei ist eine explizite Modellierung des Mengengerüsts der Flachstahlproduktion in integrierten Hüttenwerken unter Beibehaltung und Berücksichtigung aller prozessimmanenten Freiheitsgrade notwendig. Das Ziel ist dabei die Abbildung aller denkbaren Nischenprodukte und deren mögliche Produktionsketten. Implizites Wissen um die Freiheitsgrade der Produktion muss expliziert werden und in einer transparenten Systemumgebung verfügbar sein. Darüber hinaus sollte das zugehörige Wertegerüst Eingang in das Beschreibungsmodell finden um jederzeit betriebswirtschaftliche Implikationen von Auftragsannahmeentscheidungen ableiten zu können. Das Beschreibungsmodell muss den gesamten Prozess übergreifen und darf nicht auf einzelne Produktionsbereiche beschränkt sein. Es muss modular aufgebaut und einfach erweiterbar sein, um auch den Anforderungen sich im Zeitablauf verändernder Produktionssysteme gerecht zu werden.

Das Ziel dieses Beitrags ist die Entwicklung eines Beschreibungsmodells des Produktionssystems, welches die oben genannten Anforderungen erfüllt. Dieses bildet die Grundlage für ein Informationssystem zur Produktkonfiguration von Flachstahlprodukten.

Im Folgenden wird daher im zweiten Abschnitt ein Ansatz zur modularen Beschreibung von Produktionssystemen in der Flachstahlerzeugung vorgestellt. Dieser wird im nachfolgenden dritten Abschnitt anhand einer illustrativen Fallstudie konkretisiert. Hierbei werden auch Aspekte einer prototypischen Implementierung dargestellt. Den Abschluss bildet ein Ausblick über die Einsatzmöglichkeiten des entwickelten Produktkonfigurators.

2 Entwicklung eines Beschreibungsmodell für Flachstahlprodukte

Die Entwicklung eines Beschreibungsmodells von Produktionssystemen für Flachstahlprodukte erfolgt in einem dreistufigen Verfahren. In einer ersten Stufe werden die Produktionsketten in ihre elementaren Umformprozesse zerlegt und darauf basierend standardisierte Kategorien von Prozessmodulen identifiziert. In der zweiten Stufe werden für jede Modulkategorie die zugrundeliegenden Zusammenhänge zwischen physikalischen Eingangs- und Ausgangsgrößen unter Berücksichtigung der zugehörigen technischen Parameter modelliert. Abschließend werden in der dritten Stufe Kopplungsmechanismen zum Zusammensetzen von Modulen zu Prozessketten entwickelt. Die einzelnen Stufen werden im Folgenden detaillierter hinsichtlich des Vorgehens und der Ergebnisse dargestellt.

Die Zerlegung der Prozessketten in Module erfolgt mit dem Ziel, Zusammenhänge zwischen physikalischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des verarbeiteten Materials systematisch beschreiben zu können. Dadurch wird die Grundlage zur Beschreibung der technologischen Flexibilität in der Produktion geschaffen. Um dies zu gewährleisten, ist eine Modellierung von Elementaroperationen erforderlich. Hierzu erfolgt die Detaillierung der gesamten Prozesskette bis auf die modulare Ebene von Arbeitsgängen, die höchstens eine Materialumformung durchführen. Aus der den Arbeitsgängen zugrundeliegenden Umformtechnik ergibt sich, in Anlehnung an [1], eine standardisierte Klassifikation der Prozessmodule in Modulkategorien, welche in Bild 1

dargestellt ist. So wird zwischen Modulen ohne Materialveränderung, Modulen mit spanender Umformung und Modulen mit spanloser Umformung unterschieden. In nicht-umformenden Modulen verändern sich die physikalischen Parameter des durchlaufenden Materials nicht. Dies können beispielsweise Lager- oder Transportprozesse sein. Hierzu gehören auch urformgebende Prozesse, da in diesen die Materialparameter festgelegt und nicht verändert werden. In Modulen mit spanender Umformung wird gezielt eine Dimension des passierenden Materials verändert. Hierbei wird die Masse des Materials geändert. Die zwei anderen Materialdimensionen bleiben bei diesem Umformvorgang konstant. Beispiele für die spanende Umformung sind Schneidprozesse, bei denen gezielt Breite oder Länge des passierenden Materials angepasst werden. In Modulen mit spanloser Umformung wird ebenfalls gezielt eine Dimension des Materials verändert, wobei allerdings sowohl die Masse als auch eine zweite Dimension des durchlaufenden Materials konstant bleiben. Die zugehörige dritte Dimension des Materials ergibt sich in Abhängigkeit von der Änderung der ersten Dimension. Ein spanloser Umformprozess ist beispielsweise das Walzen, bei dem gezielt die Dicke des passierenden Materials verringert wird, wobei die Breite und die Masse im Wesentlichen konstant bleiben. Die Länge des Materials verändert sich in Abhängigkeit von der Dickenänderung. Mit Hilfe der zehn zunächst qualitativ beschriebenen Modulkategorien lassen sich alle materialformenden Produktionsprozesse zur Erzeugung von Flachstahlprodukten darstellen.

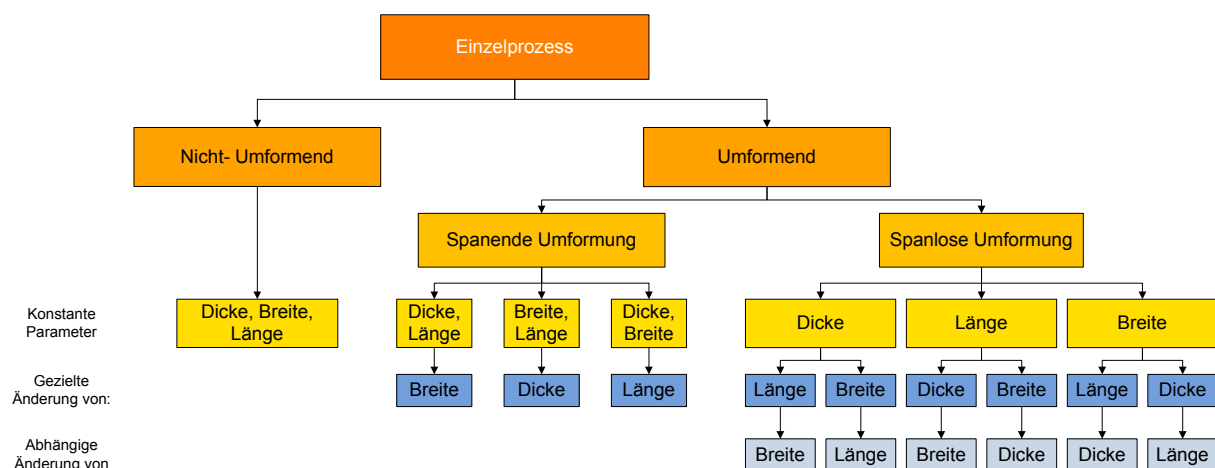


Bild 1: Kategorien von Prozessmodulen [in Anlehnung an [1], S. 11]

In der zweiten Stufe des Vorgehensmodells wird für jede Modulkategorie eine quantitative techno-ökonomische Modellierung des in ihr enthaltenen Elementarprozesses entwickelt. Die zu beschreibenden Größen sind neben der Masse des zu bearbeitenden Materials auch dessen geometrische Dimensionen Dicke, Breite und Länge. Die explizite Modellierung der einzelnen Materialdimensionen erlaubt zunächst die Berücksichtigung von Restriktionen hinsichtlich der Materialdimensionen vor und nach einem Elementarprozess, beispielsweise einer maximalen Einsatzbreite. Modulabhängig werden weiterhin für jede der Größen physikalische Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsausprägung formuliert.

Im Rahmen der Modellierung werden kategorienspezifisch die minimal notwendige sowie die maximal mögliche Umformung berücksichtigt. Minimal notwendige Umformungen (Δ^{min}) sind Materialveränderungen, die unbedingt an jedem durch das Modul laufende Materialstück durchgeführt werden müssen. Dies kann beispielsweise beim Walzen das Reduzieren der Ausgangsdicke auf eine Maximaldicke am Ende des Walzvorgangs oder beim Saumschneiden das Ein-

halten eines technologisch notwendigen Mindestsaums sein. Maximal mögliche Umformungen (Δ^{max}) geben technologische oder organisatorische Obergrenzen der spezifischen Materialveränderung an. Dies kann beispielsweise ein maximales Walzmaß oder eine maximal zulässige Saumbreite sein. Im Regelfall sind in der Flachstahlproduktion zwischen diesen technologischen Extrema alle Produktionsvarianten zulässig. Daher lassen sich die Produktionsmöglichkeiten eines Moduls hinsichtlich der Materialveränderung als Linearkombination zwischen minimaler und maximaler Umformung darstellen. Die hierbei eingeführte Variable λ beschreibt nicht nur die Abstimmungsmöglichkeiten zwischen minimaler und maximaler Umformung, sondern dient, als Äquivalent der zu verrichtenden Umformarbeit, auch als Anknüpfungspunkt für Bewertungs- und Planungsfunktionen. Die so entstehende Modellierung kann als Engineering Production Function verstanden werden, da sie technologische und betriebswirtschaftliche Produktionsaspekte vereint (vgl. [2], S.28).

Zur Konkretisierung wird im Folgenden die allgemeine Formulierung der Kategorie von Walzmodulen dargestellt. Dies ist eine spanlose Materialumformung, bei der die Produktdicke definiert geändert wird, wobei die Produktbreite im Wesentlichen konstant bleibt. So ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen Breite b^{Ein} bzw. b^{Aus} , Dicke d^{Ein} bzw. d^{Aus} , Länge l^{Ein} bzw. l^{Aus} und Masse g^{Ein} bzw. g^{Aus} unter Berücksichtigung der minimalen und maximalen Dickenänderung Δd^{min} bzw. Δd^{max} .

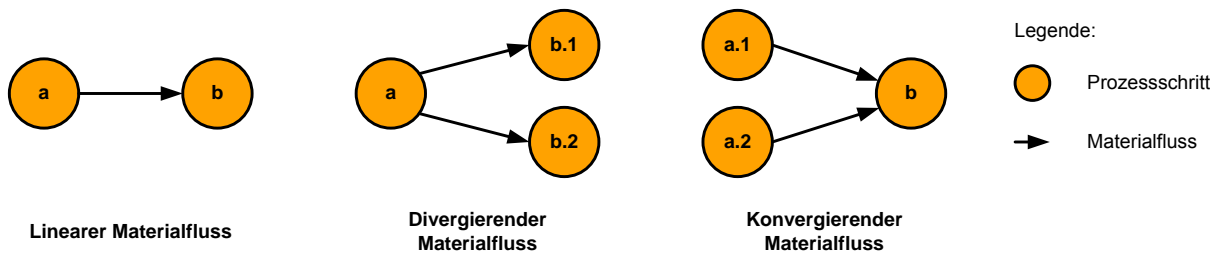
$$d^{Aus} = d^{Ein} + \Delta d^{min} + \lambda \cdot (\Delta d^{max} - \Delta d^{min}) \quad (1) \quad b^{Aus} = b^{Ein} \quad (4)$$

$$l^{Aus} = l^{Ein} \cdot \frac{d^{Ein}}{d^{Ein} + \Delta d^{min} + \lambda \cdot (\Delta d^{max} - \Delta d^{min})} \quad (2) \quad g^{Aus} = g^{Ein} \quad (5)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad (3) \quad d^{Aus} \geq \text{Minimaldicke} \quad (6)$$

Hierbei beschreibt Formel (1), dass sich die Ausgangsdicke aus der Eingangsdicke, der minimal notwendigen Dickenänderung sowie einer beliebigen darüber hinaus gehenden bis hin zur insgesamt maximal möglichen Dickenveränderung ergibt. Sowohl Breite als auch Masse bleiben im Rahmen dieses Elementarprozesses konstant, wie in Formel (4) und (5) dargestellt. Die resultierende Ausgangslänge ergibt sich, unter Berücksichtigung der konstanten Masse und Breite, als zum Verhältnis der Dickenänderung umgekehrt proportionale Veränderung der Eingangslänge (2). Um sicherzustellen, dass die betrachtete Dickenveränderung den technologischen Randbedingungen entspricht, darf sich die Variable λ hierbei lediglich zwischen 0 und 1 bewegen, wie in Formel (3) dargestellt. Sind weitere Restriktionen bezüglich technologischer Parameter wie beispielsweise eine minimale Ausgangsdicke zu berücksichtigen, so können diese äquivalent zu Formel (6) ergänzt werden. Ein solcher Baukasten von Basisformeln kann für jede Modulkategorie erarbeitet werden; auf eine vollständige Darstellung wird an dieser Stelle allerdings verzichtet.

In der dritten Vorgehensstufe ist zur Abbildung vollständiger Prozessketten eine Zusammensetzung von Prozessbausteinen gemäß dem zugrundeliegenden Materialfluss notwendig. Hierbei werden zwischen zwei aufeinanderfolgenden Prozessstufen drei Arten des Materialflusses unterschieden: der lineare, der divergierende und der konvergierende Materialfluss [vgl. [3], S. 19]. Diese sind in Bild 2 dargestellt. Beim linearen Materialfluss fließt Material von einem Vormodul zu genau einem Nachfolgemodul. Beim divergierenden Materialfluss fließt Material, ausgehend von einem Vormodul, zu einem von mehreren potentiellen Nachfolgemodulen.

**Bild 2: Arten von Materialflüssen [Eigene Darstellung]**

Beim konvergierenden Materialfluss fließt Material schließlich aus einem von mehreren vorge-lagerten Modulen in ein einzelnes Nachfolgermodul. Für jede der drei Materialflussarten ist eine universelle Kopplungsmethodik der Beschreibungsgrößen notwendig. Beim linearen Materialfluss wird diese durch das Gleichsetzen der Ausgangsgrößen des Vormoduls mit den Eingangsgrößen des Nachfolgemoduls erreicht. Dies gilt ebenso für den divergierenden Materialfluss, da an einer Nachfolgestufe immer nur das Material eingesetzt werden kann, welches die Vorstufe passiert hat. Beim konvergierenden Materialfluss gestaltet sich die Beschreibung komplexer, da die Entscheidung, welche der Vorstufen zur Erzeugung eines Produktes verwendet wird, nicht im Vorhinein festgelegt, sondern aus der impliziten Materialbeschreibung resultieren soll. Fest steht bei der Beschreibung lediglich, dass das zu verarbeitende Material bei einer einzelstück-bezogenen Beschreibung aus genau einer der n Vorstufen resultiert. Daher wird eine mathematische „Entweder-Oder“-Kopplung mittels Binärvariablen x_a eingesetzt. Diese ist jeweils genau dann gleich Eins, wenn die Produktion über Aggregat a erfolgen soll, ansonsten ist sie Null. Daraus resultieren Kopplungsbedingungen zwischen zwei Stufen $i-1$ und i , die sich wie folgt darstellen:

$$d_i^{Ein} = \sum_{a=1}^n x_a^i \cdot d_{i-1}^{Aus,a} \quad (7)$$

$$g_i^{Ein} = \sum_{a=1}^n x_a^i \cdot g_{i-1}^{Aus,a} \quad (10)$$

$$l_i^{Ein} = \sum_{a=1}^n x_a^i \cdot l_{i-1}^{Aus,a} \quad (8)$$

$$\sum_{a=1}^n x_a^i = 1 \quad (11)$$

$$b_i^{Ein} = \sum_{a=1}^n x_a^i \cdot b_{i-1}^{Aus,a} \quad (9)$$

$$x_a^i \in \{0; 1\} \quad \forall a = 1, \dots, n \quad (12)$$

Basierend auf den Erkenntnissen des vorgestellten dreistufigen Verfahrens, bestehend aus einer allgemeinen Modulklassifikation, einem Baukasten von Basisformeln für jedes Modul und universellen Kompositionsmöglichkeiten der Module, ist nun eine Modellierung beliebiger Prozessketten der Flachstahlproduktion möglich. Zunächst sind alle innerhalb einer spezifischen Prozesskette beteiligten Einzelprozesse zu identifizieren und einer der Modulkategorien zuzuordnen. Hierbei ist auch die dem Materialfluss entsprechende Kopplung der Einzelprozesse zu bestimmen. Anschließend werden für jeden der Einzelprozesse alle Restriktionen und Transformationsmöglichkeiten ermittelt. Mit Hilfe der ermittelten Daten werden parametrisierte Module für jeden Einzelprozess entwickelt. Abschließend werden die parametrisierten Module unter Verwendung der vorgestellten Kopplungsmechanismen zu einer vollständigen Prozesskette zusammengesetzt. Insgesamt ergibt sich dabei ein nichtlineares, gemischt-ganzzahliges, in der Regel

unterbestimmtes Gleichungssystem, welches eine direkte Beziehung zwischen den Materialparametern zu Beginn und am Ende des Bearbeitungsprozesses herstellt. Wird dieses gelöst, sind die Ergebnisgrößen des Modells zum Einen die stufenbezogenen Variablen λ_i zur technologischen Beschreibung der möglichen Intensität von Umformprozessen und zum Anderen die Binärvariablen x_a^i , welche in ihrer spezifischen Ausprägung Auskunft über mögliche Prozessrouten geben.

Der aufgezeigte Modellierungsansatzes erfüllt damit die in der Einleitung aufgezeigten Anforderungen vollständig. So kann sowohl das Mengen- als auch das Wertegerüst der Produktion systemseitig abgebildet und verarbeitet werden. Technologische Parameter sind transparent an den umformenden Modulen hinterlegt und können von Fachexperten gepflegt werden. Das Modell stellt weiterhin eine Kopplung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen der verarbeiteten Materialien her und kann daher sowohl zu einem spezifischen Einsatzmaterial alle möglichen Endprodukte als auch zu einem gewünschten Endprodukt alle möglichen Vorprodukte ermitteln. Die modulare Architektur erlaubt das transparente Erweitern und Verändern der abgebildeten Produktionsprozesse. Darüber hinaus können mit den kontinuierlichen Variablen λ_i und den Binärvariablen x_a^i und deren Verkettung Kosten- und Leistungsgrößen zur Bewertung des betrieblichen Aufwands abgeleitet werden.

3 Fallbeispiel

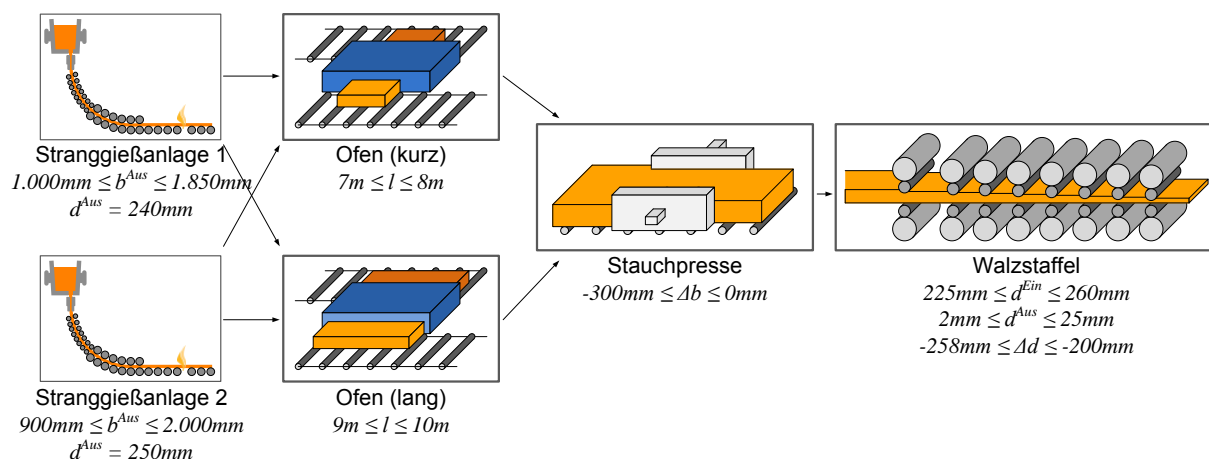


Bild 3: Beispielhaftes Produktionssystem [Eigene Darstellung]

Im folgenden Abschnitt wird der vorgestellte Modellierungsansatz anhand einer Fallstudie konkretisiert. Hierbei wird ein beispielhaftes Produktionssystem mit zwei Stranggießanlagen (SGAs) und einer Warmbreitbandstraße untersucht. Die SGAs unterscheiden sich sowohl durch die Gießdicke (240mm vs. 250mm) als auch durch die zulässigen Gießbreiten (1.000 – 1.850mm vs. 900 – 2.000mm). Die Warmbandstraße umfasst zwei Wärmeöfen, eine Stauchpresse und schließlich eine Walzstaffel. Einer der Wärmeöfen erlaubt das Durchsetzen kurzer Brammen (7.000 – 8.000mm), der andere das Durchsetzen langer Brammen (9.000 – 10.000mm). In der Stauchpresse können Brammen um bis zu 300 mm in der Breite gestaucht werden. In der Walzstaffel wird die gestauchte Bramme auf eine Dicke zwischen 2 und 25 mm gewalzt. Für den

gesamten Prozess soll ein Maximalgewicht von 30t gelten. Das Produktionssystem und die möglichen Materialflüsse sind in Bild 3 dargestellt. Zur Prozessbeschreibung werden zunächst die beteiligten Module charakterisiert. Bei den SGAs handelt es sich um urformende, bei den Wärmeöfen um nicht-umformende Prozesse. Die Stauchpresse vollzieht eine spanlose Breitenänderung unter Beibehaltung der Materialdicke. Die Walzstaffel vollzieht eine spanlose Dickenänderung unter Beibehaltung der Materialbreite. Basierend auf der Charakterisierung ergeben sich die einzusetzenden Module mit ihren jeweiligen mathematischen Grundmodellen. Unter Berücksichtigung der kurz dargestellten Prozessrestriktionen ergibt sich das folgende mathematische Beschreibungsmodell, welches das darstellbare Produktportfolio vollständig beschreibt.

$$d_1^{Aus} = 240 \quad (13) \quad d_2^{Aus} = 250 \quad (17)$$

$$1000 \leq b_1^{Aus} \leq 1850 \quad (14) \quad 900 \leq b_2^{Aus} \leq 2000 \quad (18)$$

$$0 \leq l_1^{Aus} \leq \infty \quad (15) \quad 0 \leq l_2^{Aus} \leq \infty \quad (19)$$

$$0 \leq g_1^{Aus} \leq 30 \quad (16) \quad 0 \leq g_2^{Aus} \leq 30 \quad (20)$$

Die Gleichungen (13) bis (16) beschreiben die Urformgebung in SGA 1 (Aggregat 1), die Gleichungen (17) bis (20) die Urformgebung in SGA 2 (Aggregat 2). Hierbei werden Breite, Dicke, Länge und Masse gemäß der technischen Vorgaben beschränkt.

$$d_3^{Ein} = d_3^{Aus} = x_1^3 \cdot d_1^{Aus} + x_2^3 \cdot d_2^{Aus} \quad (21) \quad d_4^{Ein} = d_4^{Aus} = x_1^4 \cdot d_1^{Aus} + x_2^4 \cdot d_2^{Aus} \quad (26)$$

$$b_3^{Ein} = b_3^{Aus} = x_1^3 \cdot b_1^{Aus} + x_2^3 \cdot b_2^{Aus} \quad (22) \quad b_4^{Ein} = b_4^{Aus} = x_1^4 \cdot b_1^{Aus} + x_2^4 \cdot b_2^{Aus} \quad (27)$$

$$l_3^{Ein} = l_3^{Aus} = x_1^3 \cdot l_1^{Aus} + x_2^3 \cdot l_2^{Aus} \quad (23) \quad l_4^{Ein} = l_4^{Aus} = x_1^4 \cdot l_1^{Aus} + x_2^4 \cdot l_2^{Aus} \quad (28)$$

$$g_3^{Ein} = g_3^{Aus} = x_1^3 \cdot g_1^{Aus} + x_2^3 \cdot g_2^{Aus} \quad (24) \quad g_4^{Ein} = g_4^{Aus} = x_1^4 \cdot g_1^{Aus} + x_2^4 \cdot g_2^{Aus} \quad (29)$$

$$7000 \cdot (x_1^3 + x_2^3) \leq l_3^{Ein} \leq 8000 \cdot (x_1^3 + x_2^3) \quad (25) \quad 9000 \cdot (x_1^4 + x_2^4) \leq l_4^{Ein} \leq 10000 \cdot (x_1^4 + x_2^4) \quad (30)$$

Der Materialfluss durch den kurzen Ofen (Aggregat 3) bzw. langen Ofen (Aggregat 4) wird durch die Gleichungen (21) bis (25) bzw. (26) bis (30) beschrieben. Die binären Variablen x_a^i geben dabei den Materialfluss vor. So ist beispielsweise die Variable x_1^3 gleich 1, wenn das Material im Rahmen der Produktion von SGA 1 zum kurzen Ofen fließen würde. Ansonsten ist der Wert der Variablen gleich null. Besonderes Augenmerk liegt auf den Gleichungen (25) und (30), welche die Länge des durch den Prozess laufenden Materials unter Berücksichtigung der Produktionsroute einschränken. Wird Material über den kurzen Ofen verarbeitet, so muss entweder x_1^3 oder x_2^3 gleich 1 sein, was zur Folge hat, dass die Einsatzlänge im angegeben Bereich liegen muss. Wird der Ofen nicht berücksichtigt, so sind sowohl x_1^3 als auch x_2^3 gleich 0, wodurch die Einsatzlänge ebenfalls auf 0 gesetzt wird.

$$x_1^3 + x_2^3 + x_1^4 + x_2^4 = 1 \quad (31) \quad x_1^3, x_2^3, x_1^4, x_2^4 \in \{0; 1\} \quad (32)$$

Gleichungen (31) und (32) stellen sicher, dass im Rahmen einer Produktionsalternative der Materialfluss nur von einer SGA zu einem Ofen möglich ist.

$$d_5^{Ein} = x_3^5 \cdot d_3^{Aus} + x_4^5 \cdot d_4^{Aus} \quad (33) \quad d_5^{Aus} = d_5^{Ein} \quad (39)$$

$$b_5^{Ein} = x_3^5 \cdot b_3^{Aus} + x_4^5 \cdot b_4^{Aus} \quad (34) \quad b_5^{Aus} = b_5^{Ein} + \Delta b_5^{min} + \lambda_5 \cdot (\Delta b_5^{max} - \Delta b_5^{min}) \quad (40)$$

$$l_5^{Ein} = x_3^5 \cdot l_3^{Aus} + x_4^5 \cdot l_4^{Aus} \quad (35) \quad l_5^{Aus} = l_5^{Ein} \cdot \frac{b_5^{Ein}}{b_5^{Ein} + \Delta b_5^{min} + \lambda_5 \cdot (\Delta b_5^{max} - \Delta b_5^{min})} \quad (41)$$

$$g_5^{Ein} = x_3^5 \cdot g_3^{Aus} + x_4^5 \cdot g_4^{Aus} \quad (36) \quad g_5^{Aus} = g_5^{Ein} \quad (42)$$

$$x_3^5 + x_4^5 = 1 \quad (37) \quad 0 \leq \lambda_5 \leq 1 \quad (43)$$

$$x_3^5, x_4^5 \in \{0; 1\} \quad (38) \quad \Delta b_5^{min} = 0; \Delta b_5^{max} = -300 \quad (44)$$

Gleichungen (33) bis (38) beschreiben den aus den Öfen zusammenlaufenden Materialfluss an der Stauchpresse, Gleichungen (39) bis (44) die Umformung innerhalb derselben. Hierbei werden durch Gleichung (44) die minimale und maximale Breitenveränderung in der Stauchpresse festgelegt.

$$d_6^{Ein} = d_5^{Aus} \quad (45) \quad d_6^{Aus} = d_6^{Ein} + \Delta d_6^{min} + \lambda_6 \cdot (\Delta d_6^{max} - \Delta d_6^{min}) \quad (49)$$

$$b_6^{Ein} = b_5^{Aus} \quad (46) \quad b_6^{Aus} = b_6^{Ein} \quad (50)$$

$$l_6^{Ein} = l_5^{Aus} \quad (47) \quad l_6^{Aus} = l_6^{Ein} \cdot \frac{d_6^{Ein}}{d_6^{Ein} + \Delta d_6^{min} + \lambda_6 \cdot (\Delta d_6^{max} - \Delta d_6^{min})} \quad (51)$$

$$g_6^{Ein} = g_5^{Aus} \quad (48) \quad 225 \leq d_6^{Ein} \leq 260 \quad (52)$$

$$g_6^{Aus} = g_6^{Ein} \quad (53)$$

$$0 \leq \lambda_6 \leq 1 \quad (54)$$

$$\Delta d_6^{min} = -(225 - 25); \Delta d_6^{max} = -(260 - 2) \quad (55)$$

$$2 \leq d_6^{Aus} \leq 25 \quad (56)$$

Der lineare Materialfluss zwischen Stauchpresse und Walzstaffel wird durch die Gleichungen (45) bis (48) beschrieben. Den Abschluss bilden die Gleichungen (49) bis (56), welche die Materialumformung durch die Walzstaffel repräsentieren. In Gleichung (52) wird die Einsatzdicke von Brammen, welche aufgrund technischer Möglichkeiten in der Walzstaffel verarbeitet werden können, definiert. Durch Gleichung (55) wird hierbei die minimale und die maximale Veränderung der Dicke festgelegt. Die minimale Veränderung ergibt sich aus dem Walzen der Bramme mit der minimalen Einsatzdicke (225mm) auf die maximale Enddicke (25mm). Die maximale Veränderung ergibt sich äquivalent aus dem Walzen der Bramme mit der maximalen Einsatzdicke (260mm) auf die minimale Enddicke (2mm). Da es sich hierbei um eine relative Veränderungsbeschreibung handelt, könnten prinzipiell durch Gleichung (49) auch eine Enddicke außer-

halb der Vorgaben erzielt werden. Um eine Gültigkeit der Beschreibung aufrecht zu erhalten, wird die Enddicke durch Gleichung (56) auf die zulässigen Endabmessungen beschränkt.

Mit Hilfe des so entstandenen Modells kann nun die Frage nach Herstellbarkeit eines Kundenauftrags beantwortet werden. So soll dem Hersteller nun eine Kundenanfrage mit einer Dicke von 4mm, einer Breite von 1.600mm und einem Gewicht von 27,5t vorliegen. Zur Auftragsprüfung werden die Auftragsparameter als Ausgangsdaten der sechsten Produktionsstufe eingesetzt. Der Auftrag ist dann zulässig, wenn das entwickelte nichtlineare Gleichungssystem eine zulässige Lösung besitzt. Dies ist im vorliegenden Beispiel gegeben.

Darüber hinaus ergeben sich aus den Lösungen des Gleichungssystems drei unterschiedliche Produktionsmöglichkeiten des Auftrags. Diese sind für Kunden in der Regel nicht relevant, interessieren aber den Hersteller. So haben die Produktionsmöglichkeiten unterschiedliche kapazitative Auswirkungen auf die Auslastung der Anlagen. Sie führen ebenso zu unterschiedlichen produktionsabhängigen Kosten. Die Produktionsmöglichkeiten des Beispielauftrags sind in Tabelle 1 dargestellt, wobei sich die angegebenen Größenparameter auf die Brammendimensionen zwischen SGA und Ofen beziehen.

Nr.	SGA	Ofen	Breite	Länge	Dicke	Gewicht	λ_5	λ_6
1	1	kurz	1.824 – 1.850 mm	8.000 – 7.890 mm	240 mm	27,5 t	0,75 – 0,83	0,62
2	1	lang	1.600 – 1.622 mm	9.122 – 9.000 mm	240 mm	27,5 t	0,00 – 0,07	0,62
3	2	kurz	1.752 – 1.900 mm	8.000 – 7.375 mm	250 mm	27,5 t	0,51 – 1,00	0,79

Tabelle 1: Produktionsmöglichkeiten des Beispielauftrags

Bei den Produktionsmöglichkeiten zeigen sich deutliche Unterschiede. So kann lediglich über SGA 1 sowohl eine kurze als auch eine lange Bramme zum Bedienen des Kundenauftrags erzeugt werden. Mittels SGA 2 ist nur das Erzeugen einer kurzen Bramme zulässig. Die möglichen Breiten dieser kurzen Bramme unterscheidet sich allerdings signifikant von den zulässigen Breiten an SGA 1. Grund dafür sind die unterschiedlichen Gießdicken.

Auch bei den zu erwartenden Umformaufwendungen zeigen sich Unterschiede. So ist an der Variable λ_5 zu erkennen, dass insbesondere bei kurzen Brammen verstärkte Umformarbeit zu leisten ist. Bei dickeren Brammen ist hingegen ein stärkeres Walzen notwendig, erkennbar an Variable λ_6 . Nichtsdestotrotz stehen der größeren Umformarbeit durch die kürzer zu verarbeitende Brammenlänge, geringere Kapazitätsbelastungen an der Stranggießanlage gegenüber. Die größenabhängigen Kapazitätsbelastungsfaktoren können ebenfalls direkt den Modellierungsergebnissen entnommen werden. Dies führt insgesamt zu einer umfassenden Bewertungsgrundlage für Produktionsmöglichkeiten.

Die in dieser Fallstudie dargestellten Ergebnisse basieren auf der Implementierung des Beschreibungsmodells in einem Prototypen eines Informationssystems. Dieser besteht aus zwei Komponenten. Dies ist zum Einen ein Datenbanksystem (Microsoft Access), welches die Daten speichert, den Programmablauf koordiniert und als Schnittstelle zum Nutzer dient, und zum Anderen ein mathematischer Solver (LINGO mit der Erweiterung für nichtlineare Probleme), welcher die Zulässigkeit nichtlinearer Gleichungssysteme prüft.

Das Datenbanksystem beinhaltet zunächst die Kategorien von Prozessmodulen. Für jede Kategorie sind mathematische Grundgerüste zur Beschreibung der Materialveränderung hinterlegt.

Weiterhin enthält die Datenbank in individuellen Datensätzen alle Parameter der abgebildeten Aggregate. Jedes abgebildete Aggregat ist einer Kategorie zugordnet. Im aggregatspezifischen Datensatz ergeben sich daher die konkrete Ausgestaltung der Parameter der Grundgerüste der Modulkategorie sowie darüber hinausgehende allgemeingültige und legierungsspezifische Restriktionen. Abschließend wird die Innenstruktur des Produktionsnetzwerks mit allen zugehörigen Materialflussmöglichkeiten definiert.

Zur Deckung von Informationsbedarfen wird das oben dargestellte mathematische Beschreibungsmodell der Produktkonfiguration dynamisch und fallbezogen erstellt. So werden jeweils die Restriktionen und Fähigkeiten im mathematischen Beschreibungsmodell berücksichtigt, welche allgemeingültig sind oder für die nachgefragte Stahllegierung relevant sind. Hierbei wird ein OLE-Objekt erzeugt, welches das oben dargestellte nichtlineare Gleichungssystem in der vom mathematischen Lösungswerkzeug benötigten Struktur enthält. Im Prototypen wird das OLE-Objekt an den Solver übergeben. Dieser prüft das nichtlineare Gleichungssystem auf Zulässigkeit und beantwortet somit die Frage der Herstellbarkeit einer Kundenanfrage. Die Ergebnisse des Solvers werden von der Datenbank entgegengenommen und für die weitere Verarbeitung im Prozess visuell aufbereitet. Die Anwendung eines Optimierungswerkzeugs eröffnet weitere entscheidungsunterstützende Potentiale, auf die im Ausblick eingegangen wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wird der Informationsbedarfs bei der Konfiguration von Flachstahlprodukten aufgezeigt. Aufbauend auf den Schwachstellen bestehender Informationssysteme in Form von Produktkatalogen werden Anforderungen an ein intelligentes Informationssystem zur Produktkonfiguration unter Berücksichtigung der Fähigkeiten des Produktionssystems abgeleitet. Es wird ein neuartiger Modellierungsansatz eingeführt, welcher modellbasiert alle möglichen Produktdimensionen von Vor- und Zwischenprodukten einer Kundenanfrage bestimmen kann. Darüber hinaus bietet der Ansatz Anknüpfungspunkte für eine Bewertung der Anfrage, da auch die zugehörigen Kapazitätsbedarfe und Umformaufwendungen bestimmt werden. Der vorgestellte Modellierungsansatz ist modular aufgebaut, um sowohl Flexibilität durch nahezu beliebige Kopplung von Produktionsmodulen als auch Transparenz durch eine stückweise nachvollziehbare Beschreibungssystematik zu gewährleisten. Eine Besonderheit ist hierbei die Berücksichtigung der Transformationsfähigkeiten eines jeden Produktionsaggregats. In der Folge geht die Modellierung deutlich über klassische produktionstheoretische Modelle hinaus, welche im Wesentlichen auf mengenbezogene Zusammenhänge fokussiert sind. Der Modellierungsansatz wird in einer illustrativen Fallstudie konkretisiert. Ebenso werden Aspekte einer prototypischen Implementierung diskutiert. Dabei wird die Anwendung des Modellierungsansatzes zur Deckung des Informationsbedarfs im Rahmen der kundenindividuellen Produktkonfiguration dargestellt.

Basierend auf dem Modellierungsansatz zur Beschreibung der Produktgrößen im Herstellungsprozess sind vielfältige Einsatzmöglichkeiten absehbar. So kann mittels des Ansatzes das Spektrum herstellbarer Produkte, insbesondere in den Nischen aktueller Produktkataloge, kundentransparent ausgeleuchtet werden. Erweisen sich Anfragen als nicht herstellbar, so kann mit Methoden der Sensitivitätsanalyse eine minimale Veränderung von Kundenwunschanforderungen ermittelt werden, die in erzeugbare Produktionsaufträge mündet. Diese Informationen können mit einem geeigneten Informationssystem sowohl direkt für den Kunden als auch für den

Vertrieb zur Verfügung stehen. So ist eine schnelle Abstimmung von Hersteller und Kunden und damit schnelle Auftragsakquise möglich.

Für den Vertrieb gehen die Einsatzmöglichkeiten deutlich über die Herstellbarkeitsprüfung hinaus. So erlauben die Anknüpfungspunkte der kapazitativen und aufwandsbezogenen Bewertung eine richtige und transparente Angebotskalkulation. Die genauere und schnellere Beantwortung von Kundenanfragen kann daher zu einem verbesserten Kundenservice und einem erhöhten Zufriedenheitspotential führen.

Auch im Bereich der Produktionsplanung des Herstellers sind die Informationen über auftragsbezogene Freiheitsgrade relevant. So entfällt die explizite Vorgabe statischer Produktionsaufträge. Vielmehr kann für jeden Produktionsauftrag, auf Basis der Freiheitsgrade des Produktionssystems, eine flexible Beschreibung von Vor- und Zwischenprodukten zur Herstellung eines gewünschten Endprodukts erzielt werden. In der Folge können die bestehenden Freiheitsgrade in der Produktionsplanung berücksichtigt und betriebswirtschaftlich sinnvoll genutzt werden. Ein Beispiel hierfür ist der Lagerabgleich, eine Fragestellung, bei der verfügbare Brammen optimal offenen Kundenaufträgen zugewiesen werden sollen. Durch den Modellierungsansatz wird erstmalig eine prozessübergreifende Prüfung der Einsatzfähigkeit von Vorprodukten für Endkundenaufträge möglich.

Darüber hinaus können auch visionäre Planungsfragestellungen adressiert werden. So bieten die produktionsseitigen Freiheitsgrade Anknüpfungspunkte zur energetischen und ökologischen Bewertung von Produktionsalternativen, etwa durch Berücksichtigung prozessspezifischer CO₂-Emissionsfaktoren. Insbesondere vor dem Hintergrund eines steigenden Umweltbewusstseins und den daraus resultierenden Anforderungen an produzierende Unternehmen ist der Einsatz geeigneter Planungsverfahren daher Schlüssel zu einer nachhaltigen Produktion. Für die vorgestellten Fragestellungen sind allerdings die bestehenden Planungsverfahren auf die aus der Modellierung resultierenden Freiheitsgrade zu erweitern. Dies wird weiterhin Aufgabe der Forschung sein.

5 Literatur

- [1] Doege, E; Behrens, BA (2010): Handbuch Umformtechnik, Springer, Berlin.
- [2] Fandel, G (1996): Produktions- und Kostentheorie, 5. Aufl., Springer, Berlin.
- [3] Günther, HO; Tempelmeier, H (2007): Produktion und Logistik, Springer, Berlin.
- [4] Salzgitter Flachstahl GmbH (2010): Abmessungen und Ausführungen, URL: http://www.salgitter-flachstahl.de/de/Produkte/warmgewalzte_produkte/Abmessungen_und_Ausfuehrungen. Abgerufen am 22.09.2011.
- [5] Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.) (1992): Steel Manual, Stahleisen, Düsseldorf.
- [6] ThyssenKrupp Steel Europe (2010): Gesamt-Lieferprogramm >> Warmband, URL: http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/de/produkte/gesamt_lieferprogramm/warmband.jsp. Abgerufen am 22.09.2011.